

# Steigerung der Pulsspitzenleistung hochrepetierender Ultrakurzpulslaser durch nichtlineare Wechselwirkung



Jens Limpert<sup>1</sup>



Fabian Röser<sup>1</sup>



Damian Schimpf<sup>1</sup>



Oliver Schmidt<sup>1</sup>



Steffen Hädrich<sup>1</sup>



Jan Rothhardt<sup>1</sup>



Tino Eidam<sup>1</sup>



Cesar Jauregui<sup>1</sup>



Büleend Ortac<sup>1</sup>

Ultrakurze Laserpulse können heute routinemäßig erzeugt werden und haben eine Reihe von Anwendungen in Bereichen der Physik aber auch anderen Wissenschaften wie Biologie oder Chemie gefunden, wo sie zur Untersuchung von Vorgängen im Femtosekundenbereich eingesetzt werden. Werden solche Pulse auf die entsprechenden Pulsenergien (typischerweise im Millijoulebereich) verstärkt, dann kann die Fokussierung der Laserstrahlung Intensitäten und damit verbunden elektrische Feldstärken hervorrufen, die fundamentale Wechselwirkungsprozesse in Gang setzen. Da solche Vorgänge schwer messbar sind, würde diese Grundlagenforschung von hohen Pulswiederholraten profitieren. Allerdings sind die meist verwendeten Titan: Saphir-Verstärkersysteme auf Repetitionsraten von einigen zehn Kilohertz beschränkt.

Dagegen wurden Kurzpuls-Faserlasersysteme mit Repetitionsraten von 40 MHz, die Femtosekundenpulse bei Durchschnittsleistungen von 325 W erzeugen, bereits demonstriert /1/.

Störend sind hierbei nichtlineare Effekte und die beschränkte Verstärkungsbandbreite, die eine Energieerhöhung in den Bereich mehrerer Millijoule bzw. Pulsverkürzung zu wenigen Femtosekunden verhindern. Durch die Weiterentwicklung der Fasertechnologie ist es gelungen 800 Femtosekunden-Pulse mit Pulsenergien von bis zu 1 mJ zu erzeugen /2/. Eine weitere Skalierung ist nur über alternative Konzepte möglich, die neuartige Quellen kohärenter Strahlung ermöglichen.

Die Vorteile dieser neuartigen Laserquellen sollten hervorragendes Strahlprofil, hohe Pulswiederholrate und eine mittlere Ausgangsleistung, die mehrere Größenordnungen über konventionellen Titan: Saphir-Kurzpulslasern liegt, sein.

Für die Skalierung von Faserlasersystem zu Pulsdauern von weniger als 100 fs werden am Institut für Angewandte Physik zwei Konzepte verfolgt. Das erste beschäftigt sich mit nichtlinearer Kompression. Um das zu erreichen, werden die Laserpulse mittels nichtlinearer Wechselwirkung spektral verbreitert und anschließend in einfachen Aufbauten, wie Prismenkompressoren oder gechirpten Spiegeln, in ihrer Pulsdauer verkürzt. In gewöhnlichen optischen Fasern kann die Pulsdauer um eine bis zwei Größenordnungen reduziert werden. Durch Anwendung dieser Technik konnten 27 Femtosekunden-Pulse bei einer Wiederholrate von 78 MHz mit Spitzenleistungen von 20 MW aus einem Faserlasersystem am Institut für Angewandte Physik erzeugt werden /3/. Nichtlineare Kompression für hochenergetische Pulse wird in Hohlfasern erreicht, die mit Edelgas gefüllt werden (Abb. 1).

Hohlkernfasern unterscheiden sich von gewöhnlichen Fasern, da sie einen Luftkern haben, der von Glas umgeben ist. Um den geringen nichtlinearen Koeffizienten von Luft zu erhöhen, werden die Fasern mit Edelgasen gefüllt. Die Stärke der Nichtlinearität, d. h. der nichtlineare Brechungsindex  $n_2$ , hängt vom Gasmedium und dem Druck ab. Mit dieser einfachen Kompressionstechnik konnten die 800 Femtosekunden-Pulse eines faserbasierten Kurzpulslasersystems /2/ um eine Größenordnung verkürzt werden und Pulse von 70  $\mu$ J, 70 fs bei 30 kHz und 63  $\mu$ J, 57 fs bei 100 kHz erreicht werden.

<sup>1</sup> Institut für Angewandte Physik, Friedrich-Schiller-Universität Jena

# Peak power enhancement of ultra-short pulse laser sources based on nonlinear interaction



Today, ultra-short pulses can be routinely generated and have found numerous applications in physics as well as in other sciences such as biology or chemistry, where they are used for investigation of femtosecond timescale processes. When amplified to sufficient energies (typically of the order of millijoules) focusing of such pulses results in intensities, and therefore, electrical field strengths that enable fundamental interaction of light and matter. Since these processes are hard to measure, such systems would greatly benefit from high repetition rates. However, commonly used Ti: Sapphire based laser systems are typically restricted to a few tens of kilohertz.

In contrast, short pulse fiber laser system operating at 40 MHz capable of producing femtosecond pulses at an average power of 325 W have been presented /1/.

Parasitic nonlinear effects and the limited gain bandwidth prevent the increase of energy and pulse shortening respectively. Progression in fiber technology has led to a fiber laser system with 800 femtosecond pulses at one millijoule of pulse energy /2/. Further scaling has to address alternative concepts enabling new coherent light sources. These new sources require the advantage of superior beam quality while operating at repetition rates, and therefore, average powers orders of magnitude higher than Ti: Sapphire laser systems.

For scaling fiber laser system to pulse durations shorter than 100 fs, the Institute of Applied Physics presented two approaches. The first one uses nonlinear compression. To achieve this, laser pulses are broadened spectrally by nonlinear interaction and subsequent reduction of pulse duration is achieved by compressing them in simple setups, e.g. prism or chirped mirror compressors. In conventional fibers this technique can lead to pulse reduction of one to two orders of magnitude.

Applying this compression scheme to a fiber laser system at the Institute of Applied Physics has lead to 27 femtosecond pulses at a repetition rate of 78 MHz with 20 MW of peak power /3/. Nonlinear compression of high energy pulses can be achieved by the use of noble gas filled hollow core fibers (Fig. 1).

Hollow core fibers differ from conventional fibers since they have an air core surrounded by glass. To achieve self-phase modulation the fibers are filled with noble gases. The strength of the nonlinearity, namely the nonlinear index of refraction  $n_2$ , depends on the gas medium and the pressure. Utilizing this compression scheme it was possible to shorten the 800 femtosecond pulses of a fiber based short pulse system /2/ by more than an order of magnitude and achieve pulses with 70  $\mu$ J, 70 fs at 30 kHz and 63  $\mu$ J, 57 fs (Fig. 2) at 100 kHz respectively.

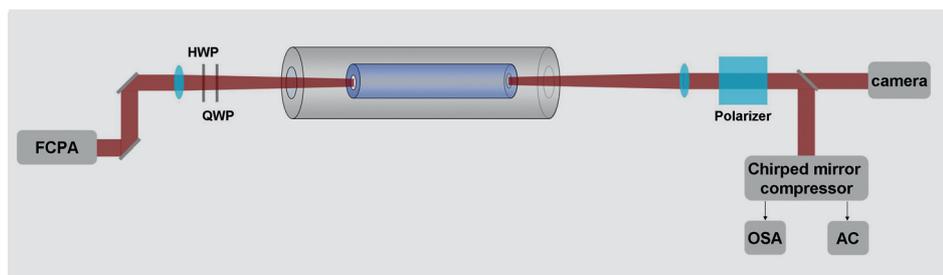


Abb. 1: Experimenteller Aufbau der nichtlinearen Kompression in Hohlfasern, die mit Edelgas gefüllt sind.

Fig. 1: Experimental setup of nonlinear compression in noble gas filled fibers.

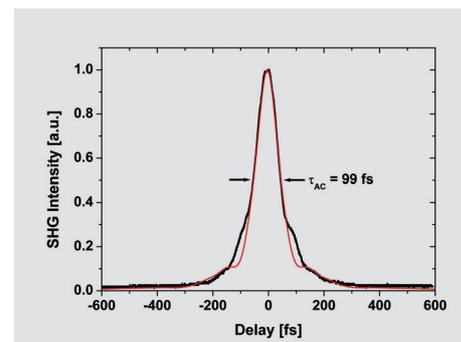


Abb. 2: Autokorrelation des komprimierten Pulses bei 100 kHz.

Fig. 2: Autocorrelation trace of the compressed pulses at 100 kHz.

Ein weiteres Skalierungskonzept basiert auf optisch parametrischer Verstärkung (engl. OPA – optical parametric amplification), welche eine enorme Verstärkungsbandbreite bietet. Um solch einen Verstärker zu betreiben, benötigt man einen hochenergetischen Pumpuls der seine Energie mittels nichtlinearer Wechselwirkung in einem Kristall auf eine breitbandigen Signalpuls überträgt. Die Pumpe wird durch den frequenzverdoppelten Ausgang unseres KurzpulsLasersystems /2/ zur Verfügung gestellt, während das spektral breitbandige Signal durch nichtlineare Wechselwirkung in einem kurzen Stück Faser erzeugt wird.

In einem ersten Experiment betrieben wir unser Kurzpuls-FaserLasersystem /2/ bei einer Wiederholrate von 100 kHz und einer Pulsenergie von 410  $\mu\text{J}$ , die in einem frequenzverdoppelten Pumpuls mit 220  $\mu\text{J}$  Pulsenergie resultiert. Eine Signalbandbreite von 43 nm wurde erreicht, indem ein kleiner Teil ( $\sim 1\%$ ) des Ausgangs des Kurzpuls-FaserLasersystems abgespalten und in eine 8 cm lange photonische Kristallfaser mit 33  $\mu\text{m}$  Modenfelddurchmesser eingekoppelt wurde. Dieses Signal wurde mittels zweifacher optisch parametrischer Verstärkung auf 41  $\mu\text{J}$  verstärkt. Durch einen Prismenkompressor wurde die Pulsdauer auf 52 fs bei einer Pulsenergie von 37  $\mu\text{J}$  verkürzt und damit eine Pulsspitzenleistung von 500 MW erreicht /4/.

Allerdings ist dieser Ansatz durch das faserbasierte KurzpulsLasersystem selbst limitiert. Der Ausgangspuls dieses Systems ist bereits durch nichtlineare Effekte in den Verstärkerfasern deformiert. Dies beeinflusst die spektrale Verbreiterung und insbesondere die anschließende Kompression zu kurzen Pulsen.

Deshalb wurden in einem zweiten Experiment die zeitlich wohl definierten Pulse des Laseroszillators zur Erzeugung des breitbandigen Signals verwendet. Dazu wurde ein Teil der Pulsenergie des Oszillators, der als Signalquelle für das Kurzpuls-FaserLasersystem /2/ dient, abgespalten (Abb. 3).

Die zeitliche Synchronisierung von Pump- und Signalpuls wurde mit einer Multipasszelle erreicht, die einen optischen Weg von 45 m aufweist. Danach wurden die Pulse in eine 6 cm lange Standardfaser mit 6  $\mu\text{m}$  Kerndurchmesser eingekoppelt und eine Bandbreite von 68 nm erzeugt. Um das Signal zu verstärken, benutzten wir erneut einen zweistufigen optisch parametrischen Verstärker.

Die Pumpenergie für die optisch parametrische Verstärkung betrug 0,55 mJ nach Frequenzverdoppelung des faserbasierten KurzpulsLasersystems (1 mJ). Die erste Stufe wurde mit einer Pumpintensität von 300  $\text{GW}/\text{cm}^2$  betrieben und lieferte eine Verstärkung von 32 dB und damit eine Pulsenergie von 60  $\mu\text{J}$ . Die verbleibende Pumpe und das verstärkte Signal werden in einen zweiten Kristall fokussiert und damit die Pulsenergie auf 90  $\mu\text{J}$  erhöht. Die verstärkte Bandbreite ist 74 nm groß. Die Pulskompression wird mit geschirpten

Spiegeln erreicht. Die gemessene Autokorrelationsbreite der Ausgangspulse beträgt 42 fs. Das entspricht einer Pulsdauer von 29 fs und ist nur knapp über dem Fourierlimit von 27 fs. Bei einer Kompressoreffizienz von 90 % erhält man eine Pulsenergie von 81  $\mu\text{J}$  womit sich eine Pulsspitzenleistung von 2 GW ergibt /5/.

#### Literatur:

- /1/ Eidam, T.; Röser, F.; Rothhardt, J.; Hädrich, S.; Seise, E.; Gottschall, T.; Schreiber, T.; Limpert, J.; Tünnermann, A.: 325 W average power of femtosecond pulses from a fiber laser system, ASSP 2009, accepted for oral presentation.
- /2/ Röser, F.; Eidam, T.; Rothhardt, J.; Schmidt, O.; Schimpf, D. N.; Limpert, J. and Tünnermann, A.: Millijoule pulse energy high repetition rate femtosecond fiber chirped-pulse amplification system, Opt. Lett. 32, 3495-3497 (2007).
- /3/ Eidam, T.; Röser, F.; Schmidt, O.; Limpert, J.; Tünnermann, A.: 57 W, 27 fs pulses from a fiber laser system using nonlinear compression, Appl. Phys. B 92, 9-12 (2008).
- /4/ Rothhardt, J.; Hädrich, S.; Röser, F.; Limpert, J. and Tünnermann, A.: 500 MW peak power degenerated optical parametric amplifier delivering 52 fs pulses at 97 kHz repetition rate, Opt. Express 16, 8981-8988 (2008).
- /5/ Hädrich, S.; Rothhardt, J.; Röser, F.; Gottschall, T.; Limpert, J. and Tünnermann, A.: Degenerate optical parametric amplifier delivering sub 30 fs pulses with 2 GW peak power, Opt. Express 16, 19812-19820 (2008).

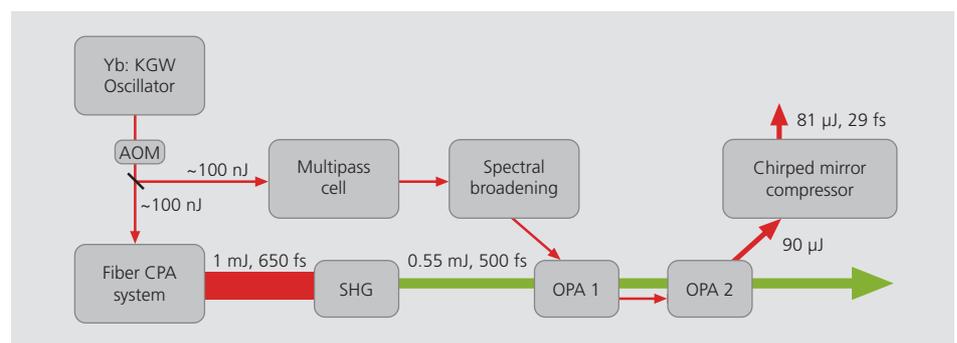


Abb. 3: Schematischer Aufbau des Faserverstärker gepumpten optisch parametrischen Verstärkers.

Fig. 3: Schematic setup of the fiber amplifier pumped degenerated optical parametric amplifier.



Another scaling concept is optical parametric amplification (OPA) which offers enormous amplification bandwidth. Operation of an ultra-short pulse OPA requires a broadband seed signal and a high energy pump that transfers its energy to the seed via nonlinear interaction in a crystal. The pump is delivered by the frequency doubled output of our short pulse fiber laser system /2/ while the broadband seed is generated via nonlinear interaction in a short piece of fiber.

In a first experiment, we operated our fiber laser system at 100 kHz repetition rate and 410  $\mu\text{J}$  pulse energy resulting in 220  $\mu\text{J}$  in the second harmonic pump pulse. By splitting a small portion ( $\sim 1\%$ ) from the output and coupling this to an 8 cm photonic crystal fiber with 33  $\mu\text{m}$  mode field diameter a bandwidth of 43 nm was achieved. This signal has been amplified in a two stage OPA system to 41  $\mu\text{J}$ . Compression in a prism compressor yielded 52 fs pulses with a pulse energy of 37  $\mu\text{J}$  resulting in 500 MW of peak power /4/.

However, this approach is limited by the short pulse fiber laser system itself. The pulse delivered by this system is already distorted by nonlinear effects in the amplifier fibers. This influences the spectral broadening and limits subsequent compression to ultra-short pulses.

Hence, in a second experiment the clean temporal pulses delivered by an oscillator were used to generate the broadband spectrum. For this reason we separated a part of seed oscillator of the short pulse fiber laser system (Fig. 3).

The temporal synchronization of pump and signal which is required for optical parametric amplification was achieved by the means of a multipass cell with 45 m of optical path and a delay stage. The near pulses of the oscillator were then injected in a 6  $\mu\text{m}$  core standard step index fiber with a length of 6 cm generating a bandwidth of 68 nm. We used a two stage optical parametric amplifier as well to amplify our signal.

The pump energy for the OPA was as high as 0.55 mJ resulting from the frequency doubled output of the fiber based short pulse system (1 mJ). The first stage is operated at a pump intensity of 300  $\text{GW}/\text{cm}^2$ , giving a gain of 32 dB and amplified pulse energy of 60  $\mu\text{J}$ . The remainder of the pump and the amplified signal are focused into a second stage which boosts the pulse energy up to 90  $\mu\text{J}$ . The amplified spectral bandwidth is as large as 74 nm. Compression of the signal in a chirped mirror compressors yields pulses with an autocorrelation width of 42 fs. This corresponds to a pulse duration of 29 fs which is only slightly above the transform limit of 27 fs. With a compressor efficiency of 90 % the pulse energy is 81  $\mu\text{J}$ . Based on this a pulse peak power of 2 GW is estimated /5/.

#### References:

- /1/ Eidam, T.; Röser, F.; Rothhardt, J.; Hädrich, S.; Seise, E.; Gottschall, T.; Schreiber, T.; Limpert, J.; Tünnermann, A.: 325 W average power of femtosecond pulses from a fiber laser system, ASSP 2009, accepted for oral presentation.
- /2/ Röser, F.; Eidam, T.; Rothhardt, J.; Schmidt, O.; Schimpf, D. N.; Limpert, J. and Tünnermann, A.: Millijoule pulse energy high repetition rate femtosecond fiber chirped-pulse amplification system, Opt. Lett. 32, 3495-3497 (2007).
- /3/ Eidam, T.; Röser, F.; Schmidt, O.; Limpert, J.; Tünnermann, A.: 57 W, 27 fs pulses from a fiber laser system using nonlinear compression, Appl. Phys. B 92, 9-12 (2008).
- /4/ Rothhardt, J.; Hädrich, S.; Röser, F.; Limpert, J. and Tünnermann, A.: 500 MW peak power degenerated optical parametric amplifier delivering 52 fs pulses at 97 kHz repetition rate, Opt. Express 16, 8981-8988 (2008).
- /5/ Hädrich, S.; Rothhardt, J.; Röser, F.; Gottschall, T.; Limpert, J. and Tünnermann, A.: Degenerate optical parametric amplifier delivering sub 30 fs pulses with 2 GW peak power, Opt. Express 16, 19812-19820 (2008).



Abb. 4: Superfluoreszenz in einer OPA-Stufe ohne Signal.

Fig. 4: Superfluorescence observed in an OPA stage without seed.